



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

# Offenlegungsschrift DE 199 60 765 A 1

51 Int. Cl. 7:  
H 01 S 3/083  
H 01 S 3/094  
H 01 S 3/18  
H 01 S 3/098

21 Aktenzeichen: 199 60 765.6  
22 Anmeldetag: 16. 12. 1999  
43 Offenlegungstag: 30. 11. 2000

DE 199 60 765 A 1

68 Innere Priorität:  
199 23 541. 4 21. 05. 1999

71 Anmelder:  
Dekorsy, Thomas, Dr., 52066 Aachen, DE

74 Vertreter:  
Bauer, W., Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 50968  
Köln

72 Erfinder:  
Dekorsy, Thomas, Dr., 52066 Aachen, DE; Bartels,  
Albrecht, Dipl.-Phys., 52074 Aachen, DE; Kurz,  
Heinrich, Prof. Dr.phil., 52076 Aachen, DE

58 Entgegenhaltungen:  
DE 196 35 919 A1  
US 55 90 143  
US 53 83 198

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

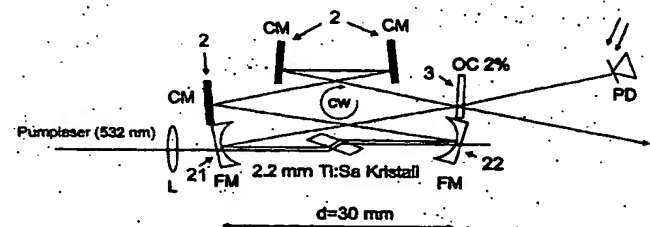
## 64 Hochrepetierlicher Femtosekundenlaser

57 Die Erfindung bezieht sich auf einen passiv modengekoppelten hochrepetierlichen Femtosekundenlaser, dessen Ringresonator die folgenden Elemente aufweist:

a) ein laseraktives Element (1),  
b) mindestens einen dielektrischen Spiegel (2), der eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion GVD aufweist, dergestalt, dass für einen zusammenhängenden Teil des durch das laseraktive Element (1) verstärkungsfähigen optischen Spektralbereichs die Summe der Gruppengeschwindigkeitsdispersionen der Spiegel (2) und der positiven Gruppengeschwindigkeitsdispersion des laseraktiven Elements (1) negativ ist, d. h.

$$\sum_n GVD_n < 0$$

c) zwei Konkavspiegel (22) und (22), die dem laseraktiven Element (2) räumlich zunächst benachbart sind und mit ihren konkaven Flächen zu diesem orientiert sind und  
d) einen optischen Auskoppler (3).  
Die optische Weglänge im Resonator ist kleiner als 60 cm, vorzugsweise kleiner als 30 cm, insbesondere kleiner als 25 cm, die Brennweiten f22 und f22 der Konkavspiegel (22) und (22) sind kleiner als 3 cm, vorzugsweise kleiner als 2 cm, insbesondere kleiner oder gleich 2,5 cm.



DE 199 60 765 A 1

## Beschreibung

Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist ein hochrepetierlicher Femtosekundenlaser gemäß des Oberbegriffs des Anspruchs 1.

Passiv modengekoppelte Femtosekundenlasersysteme zeigen hohe Pulswiederholraten im Bereich von mehreren 100 Megahertz. Bedingt durch die extrem niedrige Pulsdauer zeigen die Pulse eine hohe maximale Intensität. Femtosekundenlaser werden bereits erfolgreich im Bereich der zeitaufgelösten Spektroskopie sowie der Mehrphotonmikroskopie eingesetzt. In Zukunft werden derartige Laser auch im Bereich der optischen Datenkommunikation eine wesentliche Rolle spielen.

Gängige passiv modengekoppelte Femtosekundenlasersysteme beruhen auf der Verwendung von titandotierten Saphirkristallen als laseraktive Elementen. Diese zeigen bei optischer Anregung ein breites Fluoreszenzspektrum im Bereich zwischen 700 und 1000 nm. Aus diesem resultiert ein Verstärkungsprofil vergleichbarer Breite, das bedeutet, das Ti:Saphir-Lasersysteme zur Erzeugung von Laserlicht im genannten Wellenlängenbereich geeignet sind.

Bei der Erzeugung ultrakurzer Laserpulse muß beachtet werden, dass ein zeitlich kurzer Laserpuls mit einer breiten Frequenzverteilung korreliert ist. Aus diesem Grunde sind ausschließlich Laserelemente mit sehr breitem Verstärkungsprofil zur Erzeugung ultrakurzer Pulse geeignet.

Alle bislang bekannten passiv modengekoppelten Femtosekundenlasersysteme mit einem Festkörper als laseraktiven Element (CPM-Farbstofflaser ist auch passiv modengekoppelt) beruhen auf dem Konzept des "Kerr lens mode-locking". Dieser nichtlineare optische Effekt führt zur Verstärkung eines einzelnen im Resonator umlaufenden Pulses im laseraktiven Element.

Die Repetitionsrate eines solchen Femtosekundenlasersystems ist bestimmt durch die Umlaufdauer des im Resonator umlaufenden Pulses.

Die Dauer des resonatorumlaufenden Pulses erreicht jedoch nicht das theoretische Limit, welches durch die Breite des Verstärkungsprofils des laseraktiven Elements bestimmt ist. Dies wird verursacht durch das Phänomen der Pulsverbreiterung, welches der im Resonator umlaufende Laserpuls insbesondere im laseraktiven Element erfährt. Dieser Effekt wird verursacht durch die sogenannte positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion des laseraktiven Elements. Sie hat zur Folge, dass die unterschiedlichen Wellenlängenbestandteile des umlaufenden Pulses das laseraktive Element innerhalb unterschiedlicher Zeiten durchlaufen, wodurch der durch das laseraktive Element hindurchlaufende Laserpuls zeitlich verbreitert wird.

Der klassische Ansatz, die Pulsverbreiterung zu kompensieren, welche durch die positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion des laseraktiven Elements verursacht wird, ist die Verwendung einer Anordnung innerhalb des Laserresonators, die eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion aufweist, die die durch das laseraktive Element verursachte Pulsverbreiterung mindestens gerade kompensiert.

Vorbekannt ist beispielsweise eine Anordnung aus zwei dispersiven Elementen, beispielsweise Prismen im Laserresonator, ein sogenannter Prismenkompressor.

Grundlagen zu Femtosekundenlasersystemen, die auf "Kerr lens mode-locked" Ti:Saphir-Lasern mit Prismenkompressoren beruhen, können beispielsweise der Veröffentlichung von D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbet in Optics Letters 16, Seite 42 ff (1991) entnommen werden.

Alternativ zu den erwähnten Prismen oder Gitterkompressoren wurden in jüngster Zeit dielektrische Spiegel entwickelt, die eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion

aufweisen. Diese wird erzielt durch eine geeignete Abfolge dielektrischer Schichten auf einem Substrat. Das Grundkonzept kann der Veröffentlichung von R. Szpöcs, K. Ferencz, CH. Spielmann, F. Krausz, in Optics Letters 19, Seite 201 ff (1994) entnommen werden.

Die Verwendung solcher Spiegel mit negativer Gruppengeschwindigkeitsdispersion GVD im Laserresonator bietet den wesentlichen Vorteil, dass im Gegensatz zu den bereits erwähnten Prismen- bzw. Gitterkompressoren nur eine unwesentliche Verlängerung des optischen Wegs im Resonator auftritt. Ein Femtosekundenlasersystem, welches auf den genannten Spiegeln basiert, ist beispielsweise aus der Veröffentlichung von H. Stügl, Ch. Spielmann, R. Szpöcs, F. Krausz in Conference on Lasers and Electro-Optics 9, 1996 OSA Technical Digest Series (O. S. A., Washington D. C., 1996) S. 66 ff entnommen werden.

Eine Mehrzahl der auf dem Phänomen des "Kerr lens mode-locking" beruhenden Ti:Saphir-Femtosekundenlasersystemen beruht auf Fabry-Perot-Resonatoren, welche sich durch plane Endspiegel auszeichnen, vorzugsweise in gefalteter Konfiguration. Bei dieser Konfiguration können die zur Pulscompression nötigen Elemente wie Prismen einfach in einem Arm des Resonators untergebracht werden. Die Gesamtlänge eines solchen Resonators beträgt typischerweise in der Größenordnung von 2 Metern. Hieraus ergeben sich typische Pulsrepetitionsraten im Bereich von wenigen 100 MHz.

Aus der bereits erwähnten Veröffentlichung von A. Stügl et. al. ist beispielsweise ein passiv modengekoppeltes Ti:Saphir-Femtosekundenlasersystem bekannt, welches auf einem Fabry-Perot-Resonator beruht, und mehrere Spiegel mit negativer Gruppengeschwindigkeitsdispersion GVD verwendet.

Weiterhin ist aus der US 5,383,198 ein selbststartendes passiv modengekoppeltes Femtosekundenlasersystem mit zwei Prismenkompressoren und Ringresonator sowie aus der US 5,799,025 ein selbststartendes passiv modengekoppeltes Femtosekundenlasersystem mit einem Prismenkompressor und Fabry-Perot-Resonator bekannt.

Bedingt durch die jeweiligen Resonatorgeometrien ist es aber mit keinem der genannten Lasersysteme möglich, Pulsrepetitionsraten größer als 500 MHz zu erzielen.

Ein alternativer Zugang kann der Veröffentlichung von M. Ramaswamy und J. G. Fujimoto in Optics Letters 19, S. 1756 ff (1994) entnommen werden (siehe auch US). Er beruht auf einer vereinfachten Resonatorkonfiguration unter Verwendung eines speziellen Prismenkompressors. Statt des üblichen resonatorinternen Prismenpaares wird ein prismenförmiger Laserkristall und ein prismenförmiger Auskoppler benutzt. Eine spezielle Geometrie des als Fabry-Perot-Resonator ausgebildeten Laserresonators sowie der vereinfachte Prismenkompressor ermöglicht eine Verkürzung der Resonatorlänge auf etwa 30 cm, so dass eine Repetitionsrate von 1 GHz erreicht werden kann.

Nachteilig an diesem Konzept ist, dass im Ausgangsstrahl die in einem Laserpuls überlagerten verschiedenen spektralen Komponenten senkrecht zur Strahlrichtung räumlich auseinanderlaufen ("räumlicher chirp"), was einen praktischen Einsatz dieses Laserkonzepts zumindest erschwert.

Weiterhin erzwingt der im Resonator befindliche Prismenkompressor eine Mindestlänge des Resonators, die es unwahrscheinlich bis unmöglich erscheinen läßt, höhere Repetitionsraten als etwa 1 GHz zu erreichen.

Ziel der vorliegenden Erfindung ist es daher, einen passiv modengekoppelten Femtosekundenlaser anzugeben, der Laserpulse mit einer Dauer unterhalb von einer Picosekunde erzeugt, und dessen Repetitionsrate ohne weiteres oberhalb von 1 GHz liegen kann.

Weiterhin soll der aus dem Laserresonator ausgekoppelte Laserstrahl kein räumliches Auseinanderlaufen der spektralen Komponenten senkrecht zur Strahlrichtung mehr aufweisen.

Ziel ist es weiterhin, den Flächenbedarf eines derartigen Lasersystems gegenüber den vorbekannten Lasersystemen, insbesondere gegenüber den kommerziell erhältlichen Lasersystemen, deutlich zu verringern.

Gelöst wird diese Aufgabe durch einen passiv modengekoppelten hochrepetitiven Femtosekundenlaser gemäß den Merkmalen des Anspruchs 1.

Ein solcher Femtosekundenlaser weist ein laseraktives Element auf, welches zwischen den konkaven Flächen zweier Konkavspiegel angeordnet ist. Der zugehörige Ringresonator wird durch eine Mehrzahl von Spiegeln gebildet, von denen mindestens einer als dielektrischer Spiegel ausgebildet ist, der eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion GVD aufweist, dergestalt dass für einen zusammenhängenden Teil des durch das laseraktive Element verstärkungsfähigen optischen Spektralbereichs die Summe der negativen Gruppengeschwindigkeitsdispersionen GVD des Spiegels bzw. der Spiegel und der positiven Gruppengeschwindigkeitsdispersion GVD des laseraktiven Elements negativ ist. Dies stellt die Grundvoraussetzung für die Erzeugung von Femtosekundenpulsen dar. Weiterhin ist im Resonator ein optischer Auskoppler angeordnet.

Der Resonator ist dergestalt ausgebildet, dass die optische Weglänge im Resonator kleiner als 60 cm, vorzugsweise kleiner als 30 cm, insbesondere kleiner als 15 cm ist. Aus diesen optischen Weglängen ergeben sich Pulswiederholraten, die größer sind als 500 MHz, vorzugsweise größer als 1 GHz, insbesondere größer als 2 GHz.

Die Brennweiten der Konkavspiegel, welche dem laseraktiven Element räumlich zunächst benachbart sind, sind kleiner als 3 cm, vorzugsweise kleiner als 2 cm, insbesondere kleiner oder gleich 1,5 cm gewählt.

Ein passiv modengekoppelter Femtosekundenlaser mit diesen Merkmalen weist eine Reihe wesentlicher Vorteile auf. Die Verwendung eines Ringresonators anstelle eines linearen Fabry-Perot-Resonators ermöglicht eine deutliche Reduzierung der Resonatorlänge, was eine Grundvoraussetzung für die Erzielung hoher Pulswiederholraten ist.

Die Verwendung dielektrischer Spiegel mit negativer Gruppengeschwindigkeitsdispersion GVD anstelle von aus dem Stand der Technik bekannten Prismen- oder Gitterkompressoren ermöglicht es zusätzlich, die Länge des Ringresonators zu reduzieren. Hierdurch ist es möglich, die geometrische Länge des Resonators um über 10 cm zu reduzieren, was wiederum mit einer Erhöhung der Pulswiederholrate einhergeht.

Die Verwendung von Konkavspiegeln, die dem laseraktiven Element räumlich zunächst benachbart sind, und deren Brennweiten im vorgegebenen Bereich liegen, ermöglicht es, einen Strahldurchmesser der Resonatormode im laseraktiven Element zu erzielen, die dem Verlauf einer Resonatormode eines konventionellen linearen Fabry-Perot- oder auch eines Ringresonators jeweils mit deutlich größerer geometrischer Länge vergleichbar ist. Ein solcher kleiner Durchmesser der Resonatormode im laseraktiven Element, insbesondere einer Strahltaile im laseraktiven Element, ist unabdingbar für die effiziente Erzeugung von Laserpulsen, insbesondere für die beiden fundamentalen Effekte, die für die Erzeugung ultrakurzer Pulse in einem passiv modengekoppelten Lasersystem verantwortlich sind. Dies sind die sogenannte Selbstphasenmodulation SPM sowie die sogenannte Selbstamplitudenmodulation SAM in einem nichtlinearen Medium, insbesondere also einem laseraktiven Medium wie dem laseraktiven Element im Resonator. Beide beruhen

wiederum auf dem sogenannten Kerr-Effekt. Als Kerr-Effekt wird die Abhängigkeit des Brechungsindex von der lokalen Lichtintensität bezeichnet.

Die Selbstphasenmodulation SPM, die durch die Größe 4 charakterisiert wird, die im Laserkristall auftritt, ist wesentlich für die minimal erreichbare Pulslänge  $\tau$ . Es gilt:

$$\tau \propto \frac{|D|}{\Phi E_p}$$

Hierin ist D die über alle optischen Elemente im Resonator summierte Gruppengeschwindigkeitsdispersion GVD:

$$D = \sum_n GVD_n$$

$E_p$  ist die Pulsenergie.

Die Größe der Selbstphasenmodulation  $\Phi$  ist im wesentlichen invers proportional zum Quadrat des Strahlradius  $w$  im Laserkristall. Um eine möglichst hohe Intensität im Laserkristall zu erzielen, ist es daher unumgänglich, einen möglichst kleinen Strahldurchmesser der Resonatormode im laseraktiven Element zu erreichen, insbesondere eine Strahltaile mit möglichst kleinem Durchmesser im laseraktiven Element zu erzielen. Genau dieser Effekt wird durch die Verwendung der erfindungsgemäßen konvexen Spiegel mit den angegebenen Brennweiten bei der angegebenen maximalen Resonatorlänge erzielt.

Insbesondere sollte bei der Wahl der weiteren Resonatorparameter darauf geachtet werden, dass sich ein optisch stabiler Resonator ergibt.

Weiterhin hat sich gezeigt, dass sich ein besonders vorteilhaftes Lasersystem ergibt, wenn die Brennweiten der Konkavspiegel, die dem laseraktiven Element räumlich zunächst benachbart sind, im wesentlichen gleich gewählt sind. Dies ermöglicht vor allen Dingen ein im wesentlichen spiegelsymmetrischen Aufbau des Laserresonators.

In einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäßen Lasersystems ist der geometrische Abstand der Konkavspiegel voneinander kleiner als die Summe der Brennweiten der Konkavspiegel gewählt. Wird nur der Abstand  $d$  der Konkavspiegel voneinander variiert, während die gesamte restliche Resonatorgeometrie konstant gehalten wird, so läßt sich ein Intervall dieses Abstandes ermitteln, innerhalb dessen ein stabiler Betrieb des Laserresonators möglich ist. Dieses Intervall ist im wesentlichen symmetrisch um einen solchen Abstand der Konkavspiegel voneinander angeordnet, der genau der Summe der Brennweiten der Konkavspiegel entspricht.

Es hat sich herausgestellt, dass ein besonders stabiler Betrieb im passiv modengekoppelten Zustand möglich ist, wenn der Abstand  $d$  der Konkavspiegel voneinander kleiner als die Summe der Brennweiten der Konkavspiegel gewählt wird. Es ergibt sich ein positiver Einfluss auf die Bildung des für die passive Modenkopplung essentiellen Kerr-Effekts.

Dieser Effekt kann auch verstärkt werden, wenn das laseraktive Element nicht symmetrisch zwischen den angrenzenden Konkavspiegeln angeordnet wird, sondern gemäß den Vorschriften des Anspruchs 4. Wird eine solche Anordnung des laseraktiven Elements realisiert, so ergibt sich eine Abnahme des Strahldurchmessers im Laserkristall mit steigender momentaner Leistung im Puls. Dieser ebenfalls auf dem Kerr-Effekt beruhende Effekt wird in Kombination mit einem stärker als die Resonatormode fokussierten Pumpstrahl auch als Bildung einer "weichen Apertur" bezeichnet und fördert ebenfalls einen stabilen passiv modengekoppelten Pulsbetrieb.

In einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäßen Lasersystems wird der Abstand  $d$  zwischen den Konkavspiegeln größer gewählt als die Summe der Brennweiten der Konkavspiegel. In diesem Fall kann kein Auftreten einer "weichen Apertur" im laseraktiven Element beobachtet werden. Anstelle dieser kann jedoch eine sogenannte harte Apertur, die beispielsweise durch eine Ringblende gebildet sein kann, im Ringresonator angeordnet sein. Insbesondere ist eine solche harte Apertur an einer solchen Stelle im Resonator vorzusehen, an der die Resonatormode bei größerer Momentanleistung einen kleineren Durchmesser hat.

Es hat sich gezeigt, dass ein erfindungsgemäßes Lasersystem vorteilhaft einen titandotierten Saphirkristall als laseraktives Element verwenden kann. Weiterhin ist aber auch die Verwendung anderer laseraktiver Elemente möglich, die ein so breites Verstärkungsspektrum aufweisen, dass theoretisch die Erzeugung von Femtosekundenpulsen möglich ist. Insbesondere sind an dieser Stelle die in Anspruch 6 genannten laseraktiven Elemente zu nennen.

Zum optischen Pumpen des laseraktiven Elements kann beispielsweise ein Argon-Ionenlaser verwendet werden, der insbesondere auf die maximale Absorption des laseraktiven Elements abgestimmt wird.

In einer besonders vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäßen Lasersystems wird als Pumplaser ein Festkörperlasersystem eingesetzt, dessen Wellenlängenspektrum an das Absorptionsspektrum des laseraktiven Elements angepaßt gewählt ist. Insbesondere eignen sich hier die in Anspruch 7 genannten frequenzverdoppelten Festkörperlasersysteme. Die Verwendung von naturgemäß rauscharmen Festkörperlasersystemen als Pumplaser wirkt sich vorteilhaft auf die Intensitätsschwankungen der vom erfindungsgemäßen Lasersystem generierten gepulsten Laserstrahlung aus.

Weiterhin hat sich gezeigt, dass für einen stabilen passiv modengekoppelten Pulsbetrieb bei einem vergleichsweise guten Wirkungsgrad des erfindungsgemäßen Lasersystems der Auskoppelgrad  $T$  des optischen Auskopplers kleiner als 5% sein sollte, vorzugsweise kleiner als 3%, insbesondere kleiner oder gleich 2% sein sollte. Höhere Auskoppelgrade  $T$  erhöhen die Quanteneffizienz des Lasersystems, kleinere Auskoppelgrade  $T$  stabilisieren das erfindungsgemäße Lasersystem im passiv modengekoppelten Pulsbetrieb. Der Auskopppler wird vorteilhaft als teilreflektierender, insbesondere dielektrischer Spiegel ausgebildet.

Alternativ können auch andere Möglichkeiten zur Auskopplung realisiert werden, beispielsweise mittels Auskopplung einer evanszenten Welle, die von einer inneren Totalreflektion der Resonatormode an einer Grenzfläche herrührt. In einer solchen Ausführung kann der Auskoppelgrad in bestimmten Grenzen frei variiert werden.

In einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäßen Lasersystems weisen alle Spiegel des Ringresonators eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion GVD auf. Je nach Stärke der positiven Gruppengeschwindigkeitsdispersion GVD, welche vom laseraktiven Element verursacht wird, kann auch nur ein einziger Spiegel mit negativer Gruppengeschwindigkeitsdispersion GVD im Laserresonator eingesetzt werden. Insbesondere kann auch der Auskoppelspiegel eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion GVD aufweisen.

In einer besonders vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäßen Lasersystems ist der Ringresonator so ausgeführt, dass er astigmatismuskompensiert ist. Dies kann durch geeignete Wahl der Resonatorgeometrie, insbesondere der Reflexionswinkel auf den Konkavspiegeln realisiert werden. Insbesondere kann auf diese Weise eine Strahltaile

mit rundem Querschnitt im laseraktiven Element und/oder ein aus dem Laserresonator ausgekoppelter Strahl mit rundem Querschnitt realisiert werden. Besonders vorteilhaft zur Kompensation des Astigmatismus ist es, wenn die optische Weglänge im Ringresonator größer als 1 cm, vorzugsweise größer als 2 cm und insbesondere größer als 3,5 cm gewählt ist, da bei kleineren Weglängen extrem hohe Reflexionswinkel auf den Konkavspiegeln zur Kompensation des Astigmatismus des laseraktiven Elements realisiert werden müssen.

Besondere praktische Vorteile bei der Verwendung des erfindungsgemäßen Lasersystems ergeben sich, wenn alle Elemente des Ringresonators mechanisch auf einer gemeinsamen Montageplattform angeordnet sind. Insbesondere ist auch die Montage der optischen Komponenten in einem monolithischen Block möglich.

Besondere Vorteile des erfindungsgemäßen Lasersystems liegen in seiner hohen Pulsrepetitionsrate, die zwischen 500 MHz und etwa 10 GHz liegen kann. Weiterhin vorteilhaft ist sein gegenüber vorbekannten Lasersystem deutlich verringerter Flächenbedarf, der es ermöglicht, kostbare Stellfläche auf optischen Tischen einzusparen. Schließlich ergibt sich ein um den Faktor 10 verbessertes Signal zu Rauschverhältnis bezüglich Intensitätsschwankungen gegenüber vorbekannten, insbesondere Gaslaser-gepumpten Lasersystemen.

Weitere Merkmale und Vorteile des erfindungsgemäßen Lasersystems ergeben sich aus den nun folgenden Ausführungsbeispielen, die nicht einschränkend zu verstehen sind, und die anhand der Zeichnung erläutert werden. In dieser zeigen:

Fig. 1 eine schematische Ansicht eines erfindungsgemäßen Lasersystems in Aufsicht, dessen Ringresonator aus zwei konkaven Spiegeln und vier Planspiegeln gebildet wird,

Fig. 2 den Verlauf des Strahlradius  $w$  in einem konventionellen langen Resonator im Vergleich zu einem konventionellen verkürzten Resonator, der für eine Pulsrepetitionsrate von 1 GHz ausgelegt ist,

Fig. 3 den Verlauf des Strahltaillendurchmessers  $w$  im laseraktiven Element als Funktion der Resonatorlänge für einen Ringresonator, dessen Geometrie auf eine Resonatorlänge von zwei Metern optimiert ist.

Fig. 4 eine schematische Darstellung der relativen Position  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $d$  von Konkavspiegeln und laseraktiven Element,

Fig. 5 den Stabilitätsverlauf eines erfindungsgemäßen Lasers, dessen Resonator auf eine Pulsrepetitionsrate auf 1 GHz ausgelegt ist, als Funktion des Spiegelabstands  $d$ ,

Fig. 6 einen gemessenen Strahlquerschnitt des aus dem erfindungsgemäßen Lasersystem ausgekoppelten gepulsten Laserstrahls einschließlich einer daran angepaßten Gaußfunktion, sowie im Inset den Intensitätsverlauf senkrecht zur Strahlrichtung gemessen mittels einer CCD-Kamera,

Fig. 7 den Verlauf des Strahlradius  $w$  hinter dem Auskoppelspiegel in der Ebene des Laserresonators als Funktion des Abstands vom Auskoppelspiegel,

Fig. 8 den Verlauf der Ausgangsleistung als Funktion der Pumpleistung für ein erfindungsgemäßes Lasersystem mit einem Resonator im Pulsbetrieb mit einer Repetitionsrate von 1 GHz für zwei verschiedene Auskoppelgrade  $T$ ,

Fig. 9 eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen Lasersystems, dessen Ringresonator von zwei Konkavspiegeln und zwei Planspiegeln gebildet wird, in Aufsicht und

Fig. 10 eine Weiterentwicklung des in Fig. 1 gezeigten Lasersystems zum Erzielen einer Selbststartfunktion in einer vorgegebenen Umlaufrichtung.

Fig. 1 zeigt eine schematische Ansicht eines erfindungsgemäßen Lasersystems in Aufsicht. Der Laserresonator wird gebildet durch die Konkavspiegel 21 und 22 sowie die Planspiegel 2 und den planen Auskoppler 3. Das laseraktive Element 1 besteht aus einem titandotierten Saphirkristall mit einem Absorptionskoeffizient bei der Pumpwellenlänge von 532 nm von 5 pro cm. Die im Strahlengang befindlichen Oberflächen des Kristalls sind planparallel und optisch poliert, ihr Abstand beträgt 2,2 mm. Die Brennweite der verwendeten Konkavspiegel 21 und 22 beträgt 15 mm. Der Abstand d zwischen den Konkavspiegeln beträgt kleiner oder gleich 30 mm. Der Titansaphirkristall ist etwa mittig zwischen den Konkavspiegeln angeordnet, insbesondere entsprechend den Angaben in Anspruch 4. Als Pumplaser wird ein frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm verwendet. Dieser wird mittels der Linse L durch den Konkavspiegel 21 in das laseraktive Element 1 fokussiert. Dabei werden Resonatormode und Pumplaserstrahl im laseraktiven Element 1 möglichst genau überlagert. Der von den auf den Konkavspiegeln 21 und 22 reflektierten Strahlen eingeschlossene Winkel trägt zwischen 15 und 25 Grad, insbesondere 18 Grad. Die Gesamtlänge des Resonators ist so gewählt, dass sich eine Pulsrepetitionsrate von 1 GHz ergibt. Die Planspiegel CM tragen eine hochreflektierende dielektrische Beschichtung mit negativer Gruppengeschwindigkeitsdispersion. Der ebenfalls plane Auskoppler OC ist als teilreflektierender dielektrischer Spiegel ausgeführt. Seine Reflektivität beträgt zwischen 95 und 99%, insbesondere 98%. Hinter dem Auskoppler OC ist eine Photodiode PD angeordnet, die mittels Intensitätsmessung erlaubt, auf einfachste Weise einen Pulsbetrieb des gezeigten Lasersystems im Uhrzeigersinn nachzuweisen, nämlich durch Ausbleiben von Lichtintensität auf der Photodiode.

Fig. 2 zeigt den Verlauf der Resonatormode in einem konventionellen langen Resonator mit einer Resonatorlänge von 2 m als Funktion der Position auf der Strahlachse im Resonator im Bereich des Laserkristalls. Zum Vergleich ist der Verlauf der Resonatormode in einem konventionellen Resonator gezeigt, dessen Länge auf eine Pulsrepetitionsrate von 1 GHz optimiert wurde, ohne dass die Geometrie des Resonators abgepasst wurde. Der Inset verdeutlicht, dass eine einfache Verkürzung der Resonatorlänge eines konventionellen langen Resonators zwar prinzipiell zu einer Erhöhung der Pulsrepetitionsrate führt, sich jedoch gleichzeitig (und unvermeidlich) eine Zunahme des Strahltaillendurchmessers der Resonatormode im laseraktiven Element ergibt. Dies wirkt sich negativ auf den für die Pulsbildung elementaren Kerr-Effekt, insbesondere auf die Ausbildung einer Kerr-Linse im laseraktiven Element, aus. Eine einfache Verkürzung der Resonatorlänge eines konventionellen langen Resonators auf die für hohe Pulsrepetitionsraten erforderliche Länge wird daher im allgemeinen dazu führen, dass überhaupt kein oder kein stabiler Pulsbetrieb des Lasers mehr erreicht werden kann. Daher sind Änderungen der Resonatorgeometrie beim Übergang zu höheren Pulsrepetitionsraten unabdingbar.

Derselbe Sachverhalt wird nochmals anhand von Fig. 3 verdeutlicht. Es ist nicht möglich, zur Erhöhung der Pulsrepetitionsrate die Resonatorlänge eines bereits bekannten langen Ringresonators mit geringer Pulsrepetitionsrate auf die entsprechend kürzere Länge zu verkürzen. Gezeigt wird der Radius der Strahltaille in einem solchen konventionellen langen Ringresonator im laseraktiven Element als Funktion der Gesamtlänge des Ringresonators. Man erkennt eine starke Zunahme des Strahltaillenradius, wenn die Gesamtlänge des Resonators auf die für eine Pulsrepetitionsrate von 1 GHz erforderliche Länge von etwa 30 cm verkürzt wird.

Eine solche Zunahme des Strahltaillenradius wirkt sich außerordentlich nachteilig aus auf das Auftreten des Kerr-Effekts im laseraktiven Element und somit auf einen stabilen passiv modengekoppelten Betrieb des erfindungsgemäßen Lasersystems.

Fig. 4 dient zur Definition des Abstands d zwischen den Konkavspiegeln 21, 22 sowie der Abstände X1 und X2 des laseraktiven Elements 1 von den Konkavspiegeln 21, 22.

Fig. 5 stellt den Stabilitätsbereich eines erfindungsgemäßen Lasersystems mit 1 GHz-Resonator und Konkavspiegeln 21 und 22 mit einer Brennweite von 15 mm dar. Aufgetragen ist die Variation des Strahltaillenradius w im laseraktiven Element als Funktion der mittleren Leistung P der Resonatormode. Dabei ist w der Strahltaillenradius im laseraktiven Element 1 und P die mittlere Leistung der Resonatormode im Resonator. Die Auftragung erfolgt zweidimensional über einerseits dem Spiegelabstand d sowie andererseits der Kristallposition X1. Vorteilhaft für das Auftreten einer weichen Apertur aufgrund des Kerr-Effekts im laseraktiven Element ist ein negativer Wert der Größe  $w^{-1} \partial w / \partial P$ . Man erkennt, dass solche Bedingungen vorliegen, wenn der Spiegelabstand d kleiner gewählt wird als die Summe der Brennweiten f21 und f22 der Konkavspiegel 21 und 22. Man erkennt weiterhin, dass dieser Effekt verstärkt wird, wenn der Abstand 1 kleiner gewählt wird als die halbe Summe der Brennweiten.

Die überragende Strahlqualität des erfindungsgemäßen Lasersystems wird aus Fig. 6 deutlich. Diese zeigt die Intensitätsverteilung senkrecht zur Resonatorebene, aufgenommen mittels einer CCD-Kamera. Die durchgezogene Linie stellt eine Anpassung einer Gaußfunktion an die gemessenen Werte dar. Man erkennt die hervorragende Übereinstimmung. Der Inset zeigt die Intensitätsverteilung über den gesamten Strahlquerschnitt ermittelt mit einer CCD-Kamera. Die gemessene Intensität ist mit Helligkeitswerten korreliert. Man erkennt das weitgehend kreisrunde Strahlprofil einer TEM<sub>00</sub>-Mode.

Die hervorragende Strahlqualität zeigt sich auch im Verlauf des Strahlradius w als Funktion des Abstands vom Auskopplerspiegel. Die Punkte stellen die experimentell ermittelten Werte dar, die durchgezogene Linie einer Anpassung an den von der Theorie vorhergesagten Verlauf, wobei der Formalismus der realen Strahlausbreitung unter Einbeziehung des sogenannten M<sup>2</sup>-Faktors verwendet wurde. Man erkennt eine hervorragende Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment für einen M<sup>2</sup>-Faktor von 1,07, was sehr dicht am theoretischen Optimum von M<sup>2</sup> = 1,0 liegt.

Fig. 8 zeigt die Abhängigkeit der erzeugten gepulsten Laserleistung in Abhängigkeit von der Leistung des Pumplasers für verschiedene Transmissionsgrade T des Auskopplers 3. Im Falle eines Transmissionsgrades T von 1% ergibt sich eine Quanteneffizienz  $\eta$  von 6,6%. Diese steigt einem Auskoppelgrad T = 2% auf einen Wert  $\eta$  = 20%. Der Auskoppelgrad T = 1% stellt den kleinsten praktisch nutzbaren Auskoppelgrad des Auskopplers 3 dar. Der Auskoppelgrad T = 2% stellt im Falle des hier realisierten erfindungsgemäßen Lasersystems mit Ringresonator optimiert auf eine Puls-wiederholfrequenz von 1 GHz das experimentell ermittelte Optimum des Auskoppelgrads T dar. Es können jedoch auch höhere Auskoppelgrade T sinnvoll sein.

Ein erfindungsgemäßes Lasersystem kann auch mit einer geringeren Zahl von Spiegeln als das in Fig. 1 gezeigte System realisiert werden. Ein solches System, welches nur auf der Verwendung von zwei Konkavspiegeln und zwei Planspiegeln beruht, ist in Fig. 9 gezeigt. Es entspricht in weiten Teilen dem in Fig. 1 gezeigten System. Jedoch ist nur der mit M1 bezeichnete Planspiegel als dielektrischer Spiegel 2 mit negativer Gruppengeschwindigkeitsdispersion GVD



ausgeführt. Alle weiteren Spiegel tragen konventionelle dielektrische Beschichtungen, die auf den Konkavspiegeln hochreflektierend ausgeführt sind, sowie auf dem mit OC bezeichneten Auskoppler mit einer Transmission T von etwa 2%. Aufgrund der Tatsache, dass nur ein Spiegel mit negativer Gruppengeschwindigkeitsdispersion GVD zur Kompensation der positiven Gruppengeschwindigkeitsdispersion des laseraktiven Elements zur Verfügung steht, ist es vorteilhaft, die positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion des laseraktiven Elements so klein wie möglich zu halten. Dies kann beispielsweise realisiert werden durch eine verringerte Länge des laseraktiven Elements. Dies ist bei dem in Fig. 9 gezeigten erfindungsgemäßen Lasersystem realisiert, der Abstand zwischen den planparallelen Flächen des Titansaphirkristalls, die unter dem Brewsterwinkel gegen die optische Achse angeordnet sind, beträgt nur 1,3 mm im Gegensatz zu dem in Fig. 1 gezeigten Beispiel. Um eine vergleichbar effektive Absorption des Pumplichts auf der verringerten Länge des laseraktiven Elements 1 zu erzielen, ist es vorteilhaft, das laseraktive Element 1 mit einer höheren Konzentration an laseraktiven Ionen oder Atomen zu dotieren. Im hier gezeigten Fall wurde die Titandotierung dergestalt erhöht, dass der Absorptionskoeffizient des laseraktiven Elements 1 bei der Pumpwellenlänge auf einen Wert von  $A = 6$  pro cm anstieg. Auf diese Weise kann eine vergleichbare Absorption des Pumplichts im laseraktiven Element erreicht werden, wie in Fig. 1 gezeigten Lasersystem.

Fig. 10 zeigt das aus Fig. 1 bekannte erfindungsgemäße Lasersystem in einer vorteilhaften Weiterbildung, die aus dem zusätzlichen zugefügten Planspiegel M6 besteht. Solange das erfindungsgemäße Lasersystem im kontinuierlichen Betrieb arbeitet, laufen zwei gegenläufige Teilstrahlen im Ringresonator um. Demzufolge werden aus dem Auskoppelspiegel 3 zwei Teilstrahlen ausgekoppelt. Der Planspiegel M6 dient dazu, einen dieser beiden Teilstrahlen in den Resonator zurückzereflektieren. Dies hat den Effekt, dass die Intensität des im Uhrzeigersinn im Resonator umlaufenden Teilstrahls im laseraktiven Element 1 erhöht wird. Daher wird dieser Teilstrahl bei der Laseranregung bevorzugt und erfährt eine stärkere Kerr-Linsenbildung im laseraktiven Element 1, so dass ein Pulsbetrieb des erfindungsgemäßen Lasersystems in der Form eines im Uhrzeigersinn im Ringresonator umlaufenden Pulses bevorzugt wird. Der Spiegel M6 dient daher zur Vorgabe einer Laufrichtung des Laserpulses im Ringresonator.

Zusätzlich führt die Existenz des Planspiegels M6 dazu, dass das erfindungsgemäße Lasersystem spontan aus dem anfänglichen kontinuierlichen Laserbetrieb in den gepulsten Betrieb übergeht. Dieser Effekt kann auch verstärkt werden, indem an den Spiegel M6 eine periodische Störung angelegt wird, beispielsweise eine periodische Vibration.

Mittels eines erfindungsgemäßen Lasersystems, dessen Ringresonator auf eine Pulsrepetitionsrate von 1 GHz optimiert war, war es möglich, bei einer Pumpleistung von 1,7 Watt eine mittlere Laserleistung von 100 Milliwatt (mW) zu erzielen, wobei die erzeugten Pulse eine Dauer von etwa 50 Femtosekunden aufwiesen. Für ein erfindungsgemäßes Lasersystem, dessen Ringresonator auf einer Pulsrepetitionsrate von 2 GHz optimiert war, konnten Pulse mit einer Dauer von etwa 25 Femtosekunden erzielt werden. Es zeigte sich eine schwache Abhängigkeit der Pulsdauer  $\tau$  von der Intensität des Pumpasers. Bei einer mittleren Pumpleistung von 2,5 Watt betrug die mittlere Pulsdauer  $\tau$  29 Femtosekunden, bei einer mittleren Pumpleistung von 5,5 Watt nahm die mittlere Pulsdauer  $\tau$  auf 25 Femtosekunden ab. Eine Vermessung des Wellenlängenspektrums des im Pulsbetrieb laufenden Lasers ergab, dass die Breite der gemessenen Wellenlängenverteilung mit guter Genauigkeit der er-

mittelten Pulsdauer entsprach. Dies bedeutet, dass die Pulsdauer in erster Linie durch dispersive Effekte dritter, Ordnung begrenzt war.

Bei der Transmission des ausgekoppelten Strahls durch das Substrat des Auskoppelspiegels 3, was typischerweise eine Dicke von 5 mm aufweist, tritt wiederum eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion auf, die zu einer Verlängerung der Pulsdauer führt. Diese Verlängerung der Pulsdauer kann kompensiert werden durch mehrfache Reflektion an dielektrischen Spiegeln mit negativer Gruppengeschwindigkeitsdispersion. Dies ist in Fig. 10 anhand der Spiegel M4 und M5 realisiert.

Vorteilhaft für die Verwendung eines erfindungsgemäßen Lasersystems, insbesondere für seine kommerzielle Anwendung, ist eine Montage der Elemente des Lasersystems, insbesondere der den Ringresonator bildenden Spiegel 2, 3 sowie des laseraktiven Elements 1 und aller zugehörigen Justageeinrichtungen auf einer gemeinsamen Montageplattform. Insbesondere können die Elemente des Lasersystems auch vorteilhaft in einem monolithischen Metallblock integriert werden, der beispielsweise aus Aluminium oder auch aus Invar bestehen kann.

#### Patentansprüche

1. Passiv modengekoppelter hochrepetierlicher Femtosekundenlaser, dessen Ringresonator die folgenden Elemente aufweist:

- ein laseraktives Element (1),
- mindestens einen dielektrischen Spiegel (2), der eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion GVD aufweist, dergestalt dass für einen zusammenhängenden Teil des durch das laseraktive Element (1) verstärkungsfähigen optischen Spektralbereichs die Summe der Gruppengeschwindigkeitsdispersionen der Spiegel (2) und der positiven Gruppengeschwindigkeitsdispersion des laseraktiven Elements (1) negativ ist, d. h.

$$\sum_n GVD_n < 0$$

- zwei Konkavspiegel (21) und (22), die dem laseraktiven Element (1) räumlich zunächst benachbart sind und mit ihren konkaven Flächen zu diesem orientiert sind,
- einen optischen Auskoppler (3),

dadurch gekennzeichnet, dass

- die optische Weglänge im Resonator kleiner ist als 60 cm, vorzugsweise kleiner als 30 cm, insbesondere kleiner als 15 cm,
- die Brennweiten  $f_{21}$  und  $f_{22}$  der Konkavspiegel (21) und (22) kleiner sind als 3 cm, vorzugsweise kleiner als 2 cm, insbesondere kleiner oder gleich 1,5 cm.

2. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Brennweiten  $f_{21}$  und  $f_{22}$  der Konkavspiegel (21) und (22) im wesentlichen gleich sind.

3. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand  $d$  der Konkavspiegel (21, 22) voneinander kleiner ist als die Summe der Brennweiten  $f_{21} + f_{22}$ .

4. Laser gemäß Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand  $x_1$  des laseraktiven Elements (1) vom Spiegel (21) um mehr als 2%, vorzugsweise um mehr als 5%, insbesondere um mehr als 10% vom Abstand  $x_2$  des laseraktiven Elements (1) vom Spiegel (22) abweicht.

5. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand  $d$  der Konkavspiegel (21, 22) voneinander größer ist als die Summe der Brennweiten  $f_{21} + f_{22}$  und eine harte Apertur (4), insbesondere eine Ringblende, im Ringresonator angeordnet ist. 5
6. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das laseraktive Element (1) aus Ti:Saphir, Cr:LiSAF, Cr:Forsterit, Cr:LiSGaF, Cr:LiCAF oder Yb:YAG besteht. 10
7. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß als Pumplaser ein frequenzverdoppelter Nd:YVO<sub>4</sub>-, Yb:YVO<sub>4</sub>-, Nd:YAG- oder Yb:YAG-Laser verwendet wird. 15
8. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Auskoppelgrad  $T$  des optischen Auskopplers (3) kleiner ist als 5%, vorzugsweise kleiner ist als 3%, insbesondere kleiner oder gleich 2% ist. 20
9. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Auskoppler (3) als teilreflektierender Spiegel ausgebildet ist. 25
10. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass alle Spiegel (2) eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion GDD aufweisen. 30
11. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass nur ein Spiegel (2) eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion GDD aufweist. 35
12. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Ringresonator astigmatismuskompensiert ist. 40
13. Laser gemäß Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Weglänge im Ringresonator größer ist als 1 cm, vorzugsweise größer als 2 cm, insbesondere größer als 3,5 cm. 45
14. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass alle Elemente des Ringresonators mechanisch auf einer gemeinsamen Montageplattform zusammengefasst sind. 50

---

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

---

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -



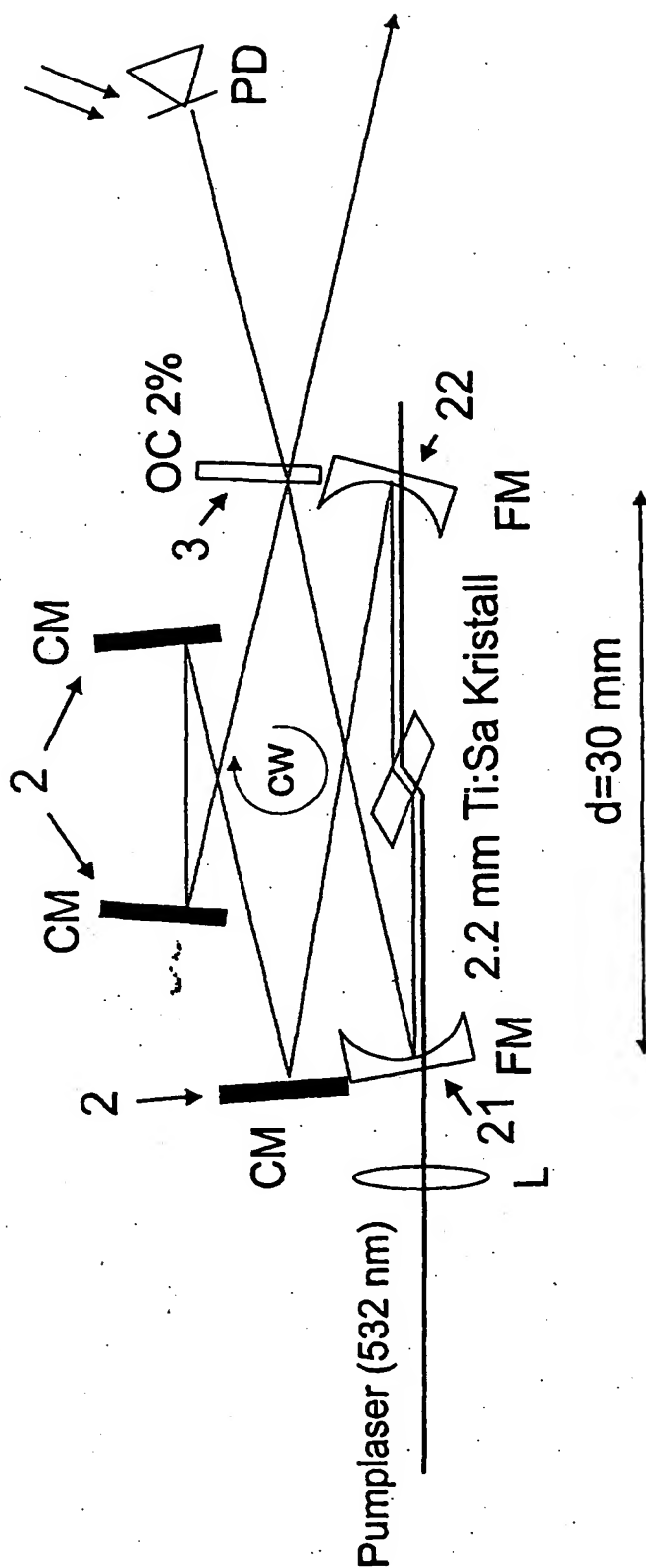


Fig. 1

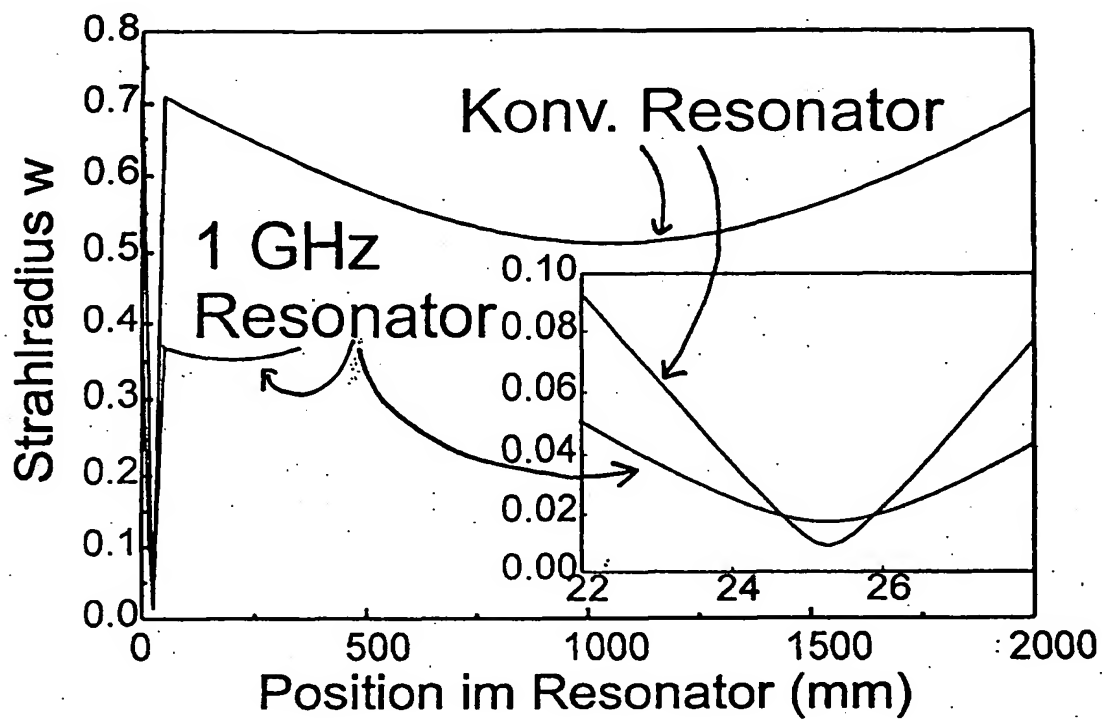


Fig.2

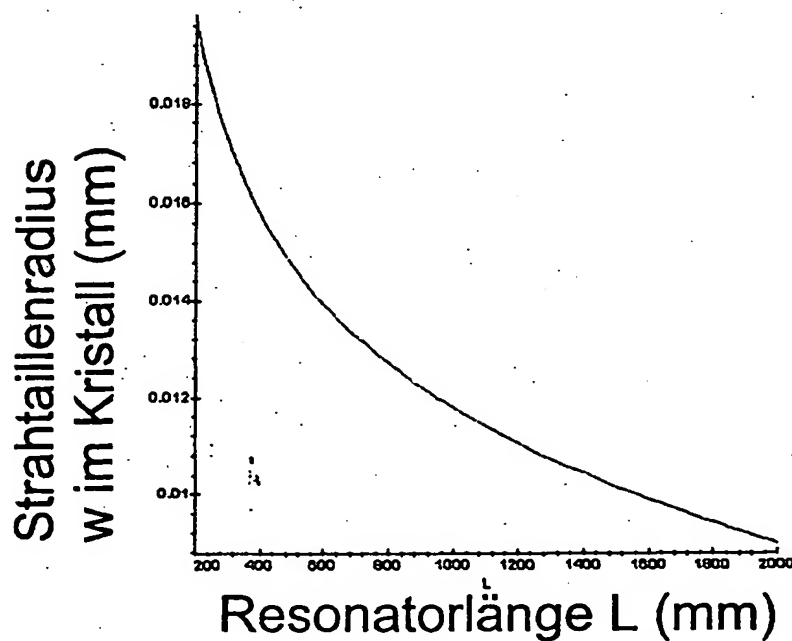


Fig. 3

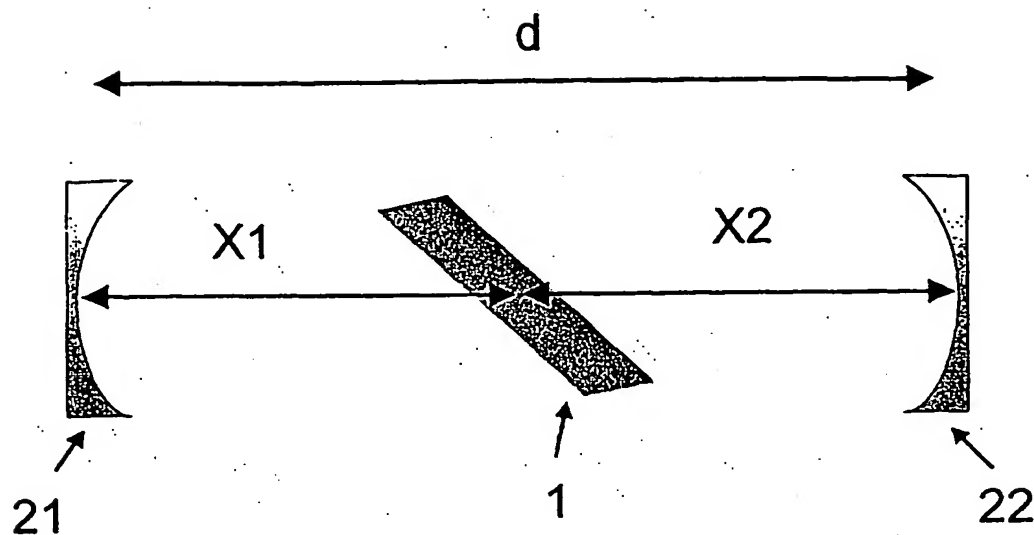


Fig. 4

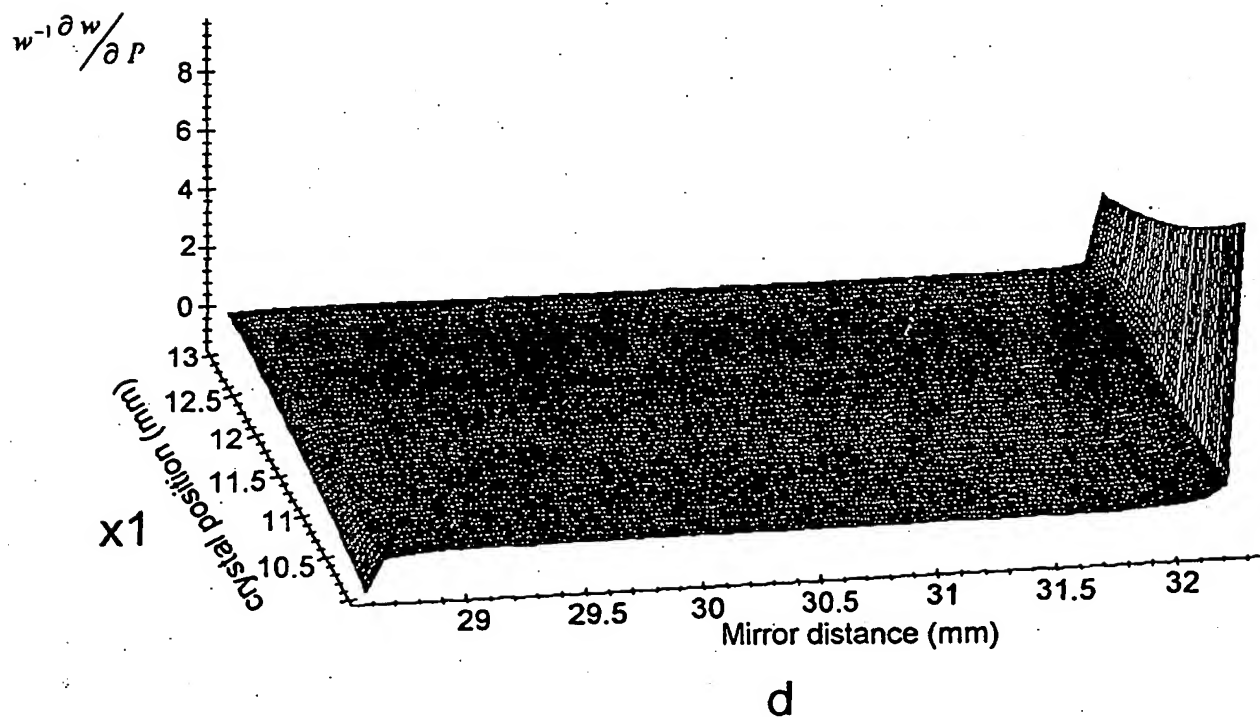


Fig. 5

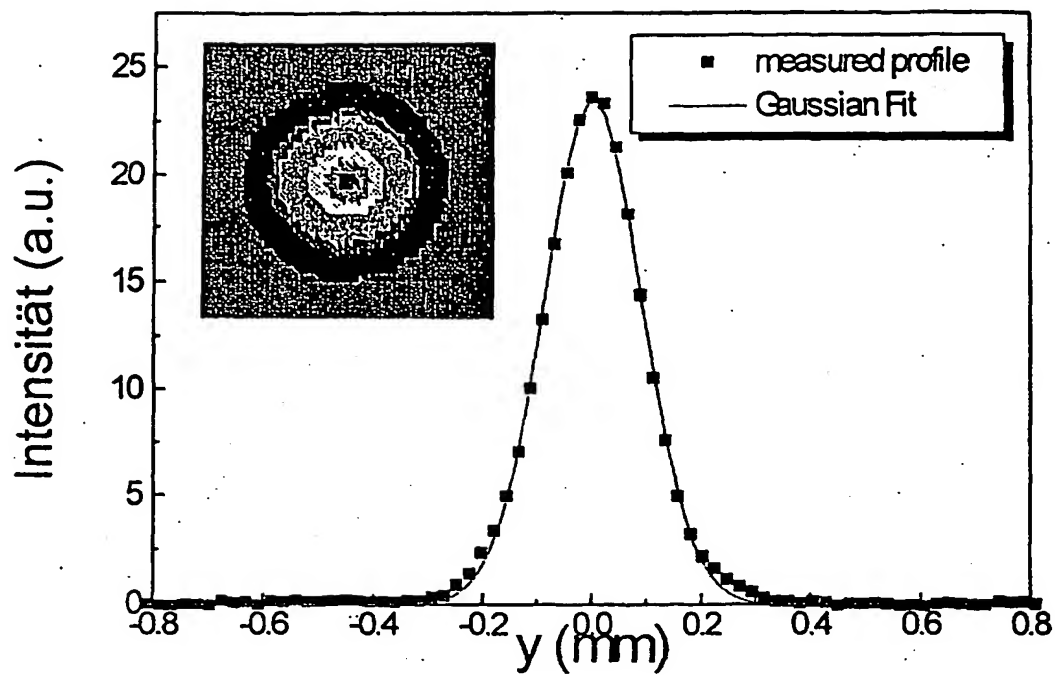


Fig. 6

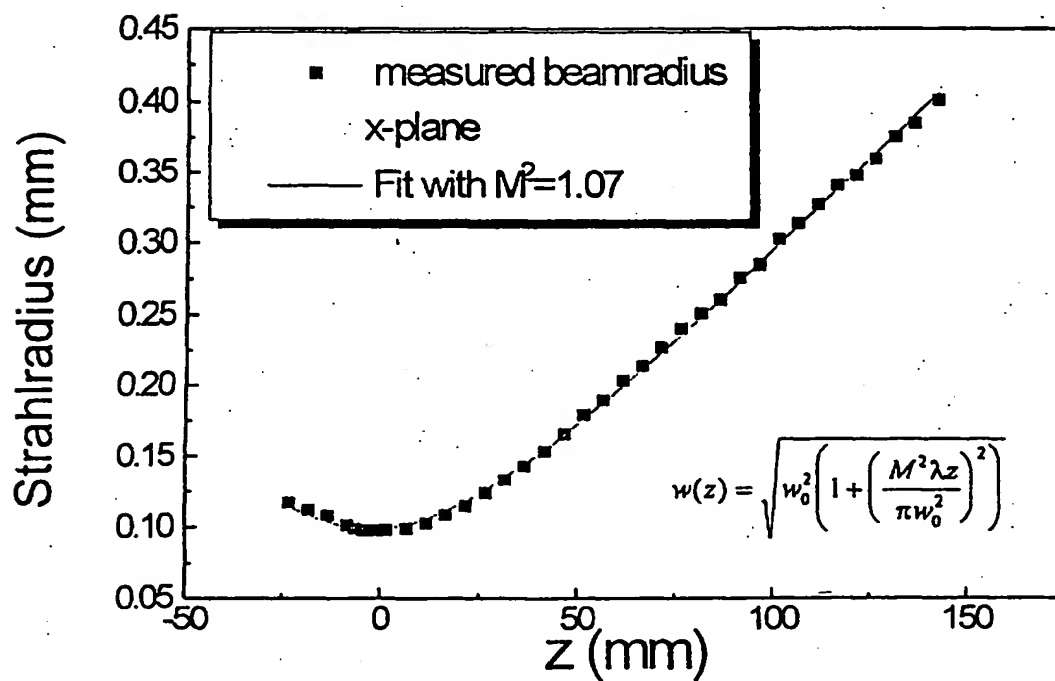


Fig. 7

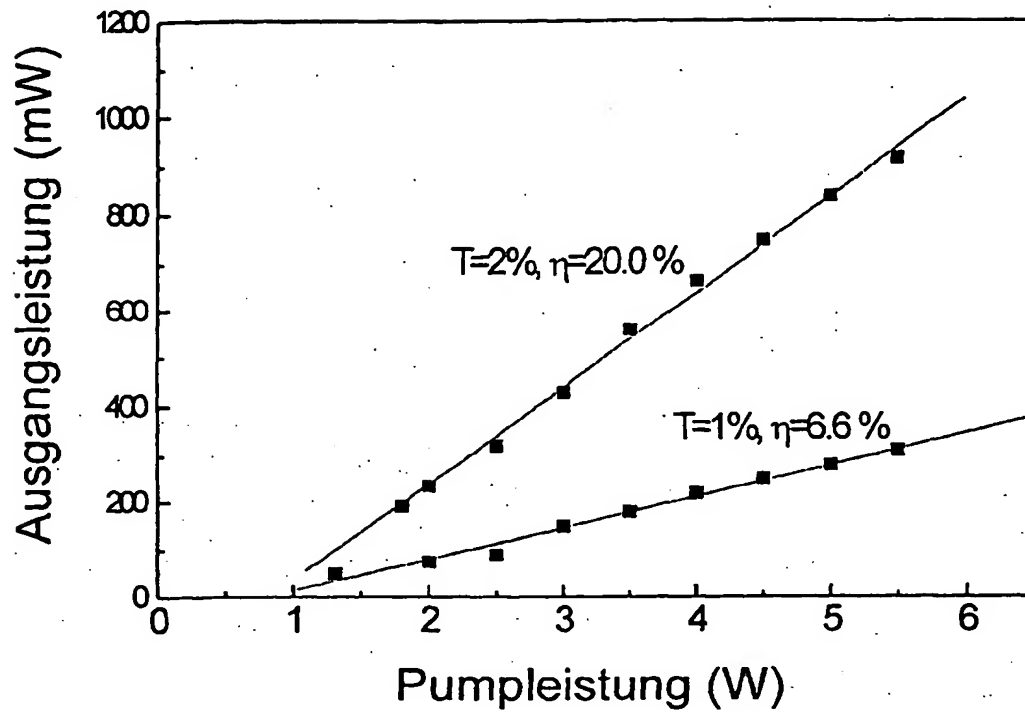


Fig. 8

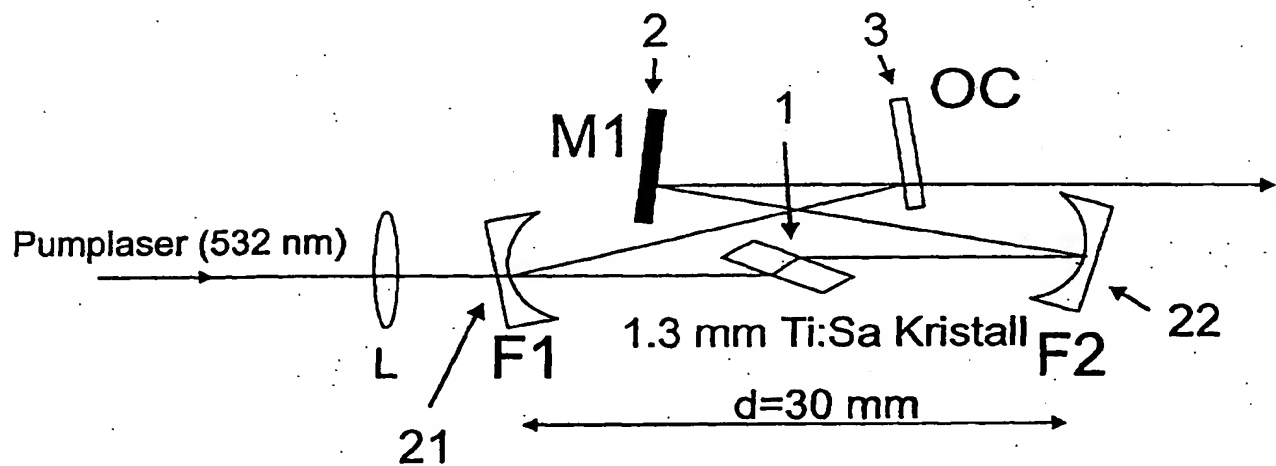


Fig. 9

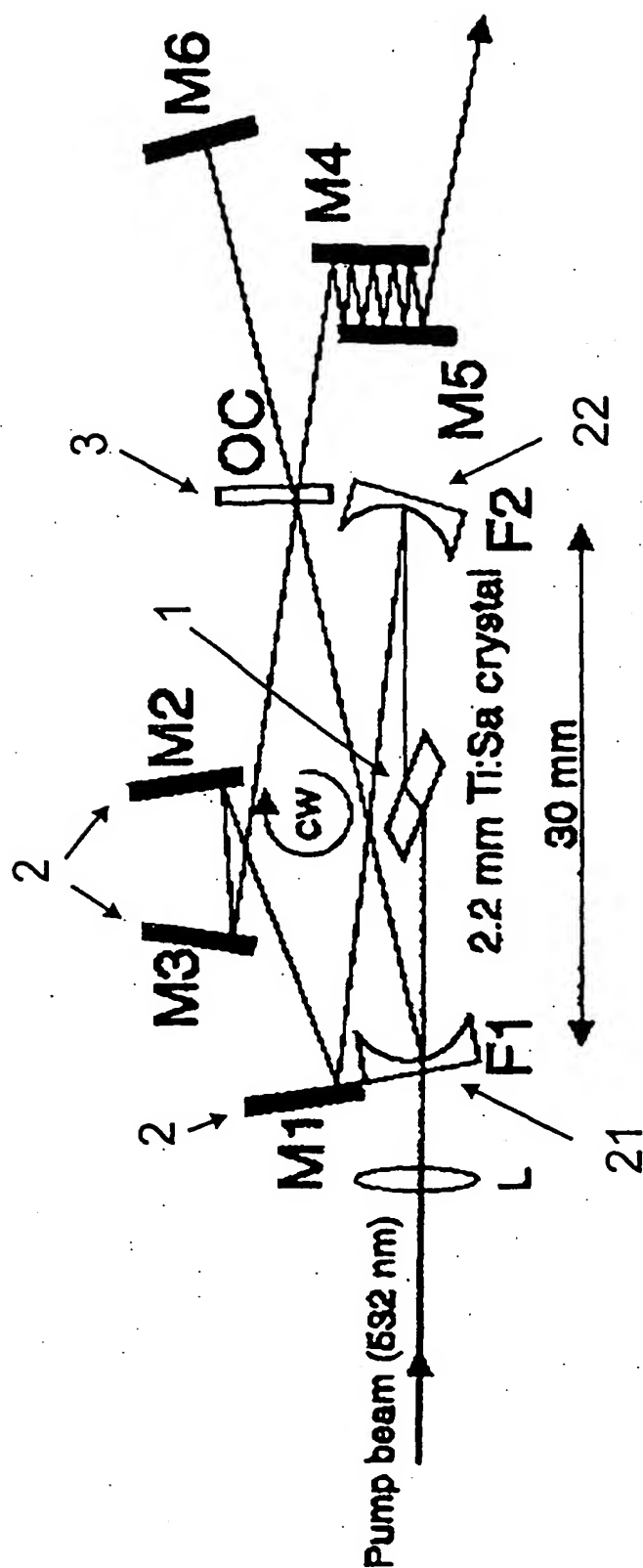


Fig. 10